تأثیر سرعت دورانی ابزار جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (FSW) قبل و بعد از عملیات حرارتی بر ریزساختار منطقهٔ اتصال آلیاژ آلومینیم 2024-T8 *

محمدعلی صفرخانیان[۱]		مسعود گودرزی[۲]		سید محمدعلی بوترابی[۳]

چکیده

جوشکاری اصطکاکی اختلاطی به طور وسیعی برای آلیاژهای آلومینیم به ویژه برای آن گروه از آلیاژهای آلومینیم که روش‌های جوشکاری ذوبی برای آنها مناسب نمی‌باشد، مانند آلیاژ آلومینیم 2024 کاربرد دارد. با وجود حذف عیوب محل اتصال در این روش جوشکاری، نرم شدن منطقه تحت تأثیر حرارت، می‌تواند یک مسئله غیرقابل پذیرش باشد. یکی از روش‌های برطرف کردن نرم شدن منطقه تحت تأثیر حرارت، عملیات حرارتی بعد از جوشکاری است؛ اما گزارش شده است که در حین عملیات انحلالی دانه‌های بسیار ریز در منطقهٔ اتصال ناپایدار می‌باشند. در این تحقیق اثر سرعت دورانی ابزار بر ریزساختار منطقهٔ اتصال آلیاژ 2024-T8 به ضخامت ۵ mm، قبل و بعد از عملیات حرارتی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که خرد شدن ذرات بین فلزی در منطقهٔ اتصال حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی اتفاق افتاده و با افزایش سرعت دورانی ابزار شدت خرد شدن ذرات بین فلزی و اندازه دانه‌های منطقهٔ اتصال افزایش می‌یابد که منجر به پایداری دانه‌های منطقهٔ اتصال حین عملیات حرارتی می‌شود.

واژه‌های کلیدی آلیاژ آلومینیم 2024، جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، رشد غیرعادی دانه‌ها

Effect of Rotational Speed of Friction Stir Welding Tool Before and After Post Weld Heat Treatment on Microstructure of Stir Zone of 2024-T8 Aluminum Alloy

M.A. Safarkhanian		M. Goodarzi		S.M.A. Boutorabi

Abstract

Friction stir welding (FSW) can be used to join aluminum alloys such as Al-2024 that are hard to weld by conventional fusion welding. Although this welding process can eliminate defects, the softening problem of heat-affected zone can be a non-acceptable problem. To recover the strength of joint, one option is fully post weld heat treatment of welded components. However, it has been reported that fine grains in the stir zone are not stable during solution treatment. In this study, a 2024-T8 aluminum alloy with 5 mm thickness is selected as the experimental material for FSW to reveal the effect of rotational speed of tool before and after post weld heat treatment on the microstructure of stir zone. It was found that the particles are broken up during friction stir welding, and the severity of the breaking up of particles and grain size in the stir zone increase with increasing rotational speed. Consequently stability of grains increases.

Key Words 2024 Aluminum Alloy, Friction Stir Welding, Abnormal Grain Growth.

---

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۸۸/۳/۵ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۸۸/۷/۲۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی دکترای مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۲) استادیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

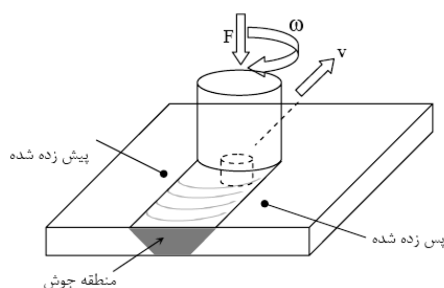
(۳) استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

مقدمه

روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی یا (Friction Stir FSW (Welding در سال ۱۹۹۱، توسط مؤسسه جوشکاری انگلستان (TWI) به عنوان یک روش نوین جوشکاری در حالت جامد، به ثبت رسیده است [1]. این روش، در مدت زمان بسیار کوتاهی به طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفت. جوشکاری FSW به طور وسیعی برای آلیاژهای آلومینیم، به ویژه برای آلیاژهایی که روش‌های جوشکاری ذوبی در مورد آنها مناسب نمی‌باشد، مانند آلیاژهای گروه ×××2، که آلیاژهای استحکام بالای آلومینیم می‌باشند، کاربرد وسیعی دارد. آلیاژ 2024 که یکی از مهمترین آلیاژهای گروه ×××2 است، به طور وسیعی در سازه‌های هوا – فضا و صنایع دیگر استفاده می‌شود. به دلیل تشکیل مک، تخلخل و ترک گرم و همچنین، افت شدید خواص مکانیکی در منطقهٔ اتصال این آلیاژ حین روش‌های جوشکاری ذوبی، آلیاژ 2024 به عنوان آلیاژی جوش ناپذیر شناخته می‌شود[2,4].

در شکل (۱) شماتیک روش FSW نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ابزار FSW شامل دو قسمت مهم می‌باشد: پین غیر مصرفی(Pin) و شانه ابزار(Shoulder) [4]. تماس شانه ابزار با سطح کار در حین چرخش ابزار، سبب تولید حرارت می‌شود و حرکت دورانی پین سبب تغییر شکل شدید مواد در محل اتصال می‌شود. بدین ترتیب همراه با آمیخته شدن مواد از دو قطعه در حال اتصال و از بین رفتن خط اتصال، تبلور مجدد دینامیکی اتفاق می‌افتد. دانه‌های منطقهٔ اتصال در این روش جوشکاری نسبت به روش‌های ذوبی که ستونی و درشت می‌باشند از ظرافت و یکنواختی مناسبی برخوردارند[5,6]. در این روش از آنجا که جوشکاری در حالت جامد انجام می‌شود، عیوب انجمادی از قبیل مک، تخلخل و ترک گرم به وجود نمی‌آیند.

در قطعات جوشکاری شده با روش FSW می‌توان بر اساس تغییرات ایجاد شده در ریزساختار، سه منطقه مجزا تشخیص داد. منطقهٔ اتصال یا SZ (Stir Zone)، منطقه تحت تأثیر فرآیند ترومکانیکی یا TMAZ(Thermo Mechanically Affected Zone) و منطقه متأثر از حرارت یا (Heat Affected Zone) HAZ. به طور معمول فرآیند FSW بر روی آلیاژ 2024 در شرایط عملیات حرارتی شده T3 یا T6 انجام می‌شود. بنابراین به دلیل حرارت ایجاد شده در حین فرآیند FSW رسوبات استحکام دهنده در مناطق TMAZ و HAZ فراپیر(Overage) شده و در نتیجه، این مناطق پس از جوشکاری ضعیف می‌باشند. یکی از روش‌های بر طرف کردن این افت استحکام، عملیات حرارتی پس از جوشکاری یا(Post Weld Heat PWHT (Treatment است.



شکل ۱ شماتیک فرآیند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی

یکی از مشکلات روش PWHT رشد غیر عادی دانه‌ها یا(AGG (Abnormal Grain Growth در منطقهٔ اتصال در حین عملیات انحلالی است [7,8]. در واقع دانه‌های بسیار ریز به وجود آمده در منطقهٔ اتصال حین فرایند FSW که ناشی از تبلور مجدد دینامیکی دانه‌ها می‌باشد، ناپایدار بوده و در حین عملیات انحلالی، تعدادی از دانه‌ها به ازای از بین رفتن دانه‌های کوچکتر، به صورت غیر عادی رشد می کنند. در اثر این پدیده اندازهٔ دانه‌ها در حد چندین میلیمتر خواهد بود که در این صورت به نام پدیده AGG شناخته می‌شود. نیروی رانش ترمودینامیکی برای پدیده AGG کاهش انرژی مرز دانه می‌باشد [8].

در مرجع [9] نشان داده شده است که پدیده AGG در منطقهٔ اتصال آلیاژ آلومینیم 7475 پس از حرارت دهی در دمای ٤٧٠ °C به مدت ۳۰ دقیقه اتفاق افتاده است. در مرجع [10] پایداری دانه‌های ریز منطقهٔ

اتـصال آلیـاژ آلـومینیم 1100 حـین عملیـات حرارتـی انحلالی بررسی شده و بیان شده اسـت کـه AGG تنهـا زمانی اتفاق می‌افتد که دمای عملیات انحلالـی بـالاتر از دمای ماکزیمم اعمـال شـده حـین فراینـد FSW باشـد. افزون بر این، با افزایش سرعت دورانی وسـعت منطقـه AGG افزایش مـی‌یابـد. امـا در مرجـع [7] بـرای آلیـاژ آلومینیم 2095 نتایجی خلاف این ارائه شـده اسـت! در مرجع [8] بیان شـده اسـت کـه در آلیـاژ 2219-O اگـر حرارت ورودی در حـین جوشـکاری پـایین باشـد، بـه عبارت دیگر اگر سرعت دورانی ابزار کم و یـا سـرعت پیشروی ابزار بـالا باشـد، انـدازهٔ دانـه در منطقـه AGG کمتر خواهد بود.

با توجـه بـه نتـایج تجربـی بیـان شـده در فـوق، می‌توان نتیجه گرفت که پدیده AGG نه تنهـا بـه نـوع آلیاژ وابسته اسـت بلکـه بـه نـوع عملیـات حرارتـی و پارامترهای جوشکاری، شامل سرعت دورانی و پیشروی ابزار، نیز بستگی دارد. با وجود تحقیقـاتی کـه بـر روی پدیده AGG انجام شـده هنـوز اثـر پارامترهـای فراینـد FSW بـر کنتـرل ایـن پدیـده در آلیـاژ آلـومینیم 2024 بررسی نشده است، بنابراین در این تحقیـق سـعی شـده است شرایط به حداقل رساندن وسعت منطقه AGG در آلیاژ یاد شده بررسی شود.

روش آزمایش

در آغاز ورق آلومینیم 2024-T8 به ضخامت ٥ mm تهیه شد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ مورد نظر در جدول(١) آورده شده است. ابعـاد نمونـه‌هـای تهیـه شده ٧ mm × ١٥بود که در راستای طـولی و عمـود بـر جهت نورد در حالت لب به لـب بـه روش جوشـکاری FSW با تغییر سرعت دورانی ابزار از ٤٥٠ به ٩٠٠ rpm و با سرعت پیشروی ٥٠ mm/min جوشـکاری شـدند. جنس ابزار جوشکاری از فولاد گرم کـار H13 انتخـاب شد. قطر شانهٔ ابزار، قطر پین و ارتفاع آن به ترتیـب ١٨، ٦ و ٤/٧ میلیمتر در نظر گرفته شدند.

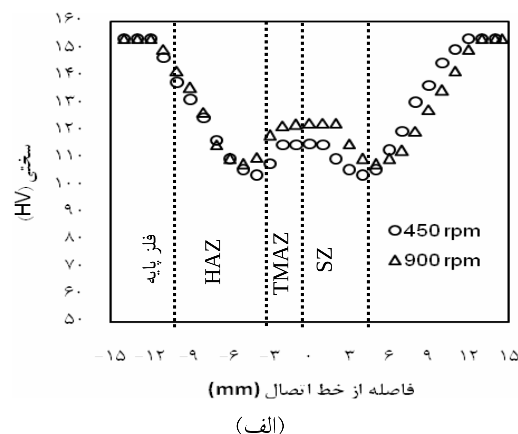
پـس از انجـام جوشـکاری، ابتـدا نمونـه‌هـای متالوگرافی عمود بر مقطع اتصال تهیه شد. نمونه‌ها قبـل و بعـد از عملیـات حرارتـی PWHT (شـامل عملیـات انحلالی در دمای ٤٩٠ °C به مدت یک ساعت و سـپس کوئنچ در آب بـا دمـای محـیط) توسـط میکروسـکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهـز به دستگاه آنـالیز طیـف سـنجی نقطـه‌ای (EDS) مـورد بررسی قرار گرفتند. جهت بررسی وجود و حذف افـت استحکام در منطقه HAZ، با استفاده از دسـتگاه میکـرو سختی، پروفیل سختی عمود بر مقطـع اتـصال در تمـام نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات PWHT، تهیه شد.

نتایج و بحث

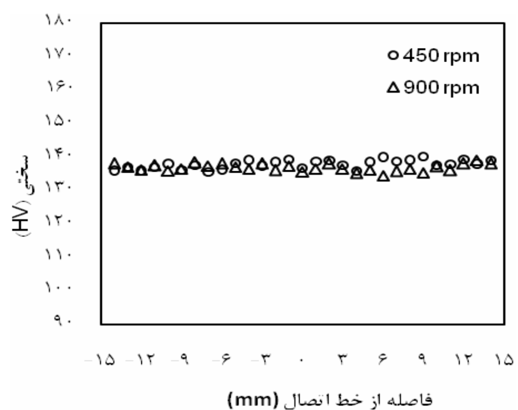
در شکل (٢) پروفیل سختی منطقهٔ اتـصال و اطـراف آن قبل و بعد از عملیات حرارتی آورده شده اسـت. همـان طـور کـه مـشاهده مـی‌شـود انـدازهٔ سـختی در مـرز TMAZ/HAZ، قبل از عملیات حرارتی کمتـرین مقـدار می‌باشد و نیز، سختی در منطقهٔ اتصال نسبت به فلز پایه پائین‌تر است. عامل اصلی افزایش استحکام و سختی در آلیاژ 2024، تشکیل ذرات بسیار ریز رسوب Al_2CuMg یا همان ذرات رسوب S در زمینه آلیاژ می‌باشد[11]. این رسوب‌ها با اعمال حرارت نسبتاً بالا حین فرایند FSW، درشت می‌شوند. در نتیجـه سـختی در منـاطق حـرارت دیده کاهش می‌یابد. با انجام عملیـات حرارتـی پـس از جوشکاری تمام این اثرات حذف می‌شوند، (شکل ٢ ب).

جدول ١ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ 2024-T8 مورد استفاده در این تحقیق

خواص مکانیکی			ترکیب شیمیایی						
ازدیاد طول نسبی	استحکام تسلیم	استحکام نهایی	Zr	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Al
٦%	٤٦٠ MPa	٤٥٠ MPa	٠/٢	٠/١١	٠/٢٦	٠/٧٢	١/٤٨	٤/٤٣	Bal.



(الف)

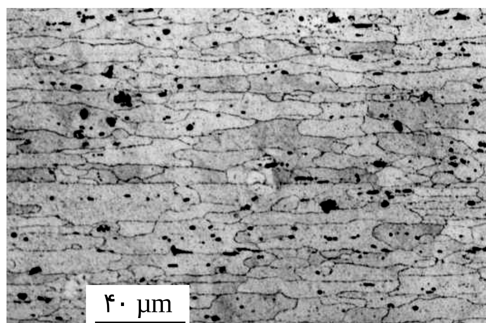


(ب)

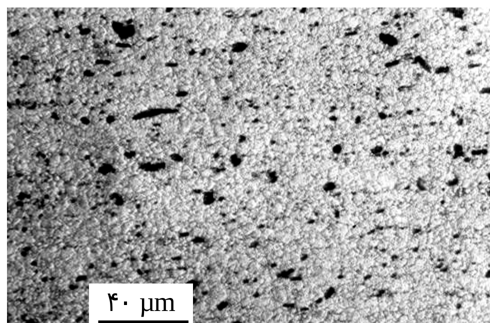
شکل ۲ پروفیل سختی از مقطع عمود بر منطقهٔ اتصال الف) قبل از عملیات حرارتی و ب) بعد از عملیات حرارتی.

تصاویر متالوگرافی شکل (۳) مربوط به فلز پایه و منطقهٔ اتصال می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود دانه‌ها در منطقهٔ اتصال بسیار ریز و هم محور بوده و این در حالی است که دانه‌ها در فلز پایه در راستای نورد کشیده شده می‌باشند. این دانه‌های هم محور و بسیار ریز نشان دهندهٔ تبلور مجدد دینامیکی حین فرایند FSW است [2].

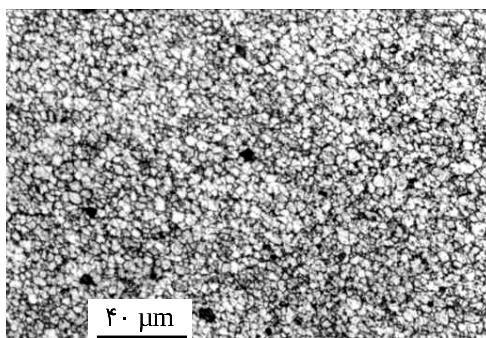
در شکل (٤) تصاویر متالوگرافی مربوط به منطقهٔ اتصال بعد از عملیات PWHT آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود رشد غیر عادی دانه‌ها در کل منطقهٔ اتصال مربوط به نمونه‌ای است که سرعت دورانی ابزار درحین جوشکاری آن ٤٥٠ rpm بوده است ولیکن این پدیده در نمونه مربوط به سرعت دورانی ۹۰۰rpm کنترل شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به الف) فلز پایه ب) مقطع اتصال ω = 450 rpm و ج) ω = 900 rpm

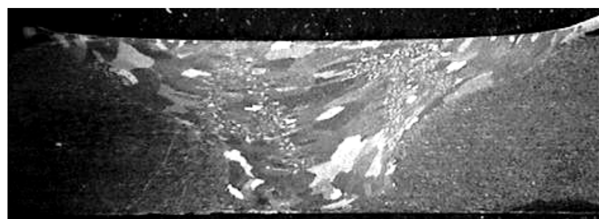
Charit و همکارانش [12] با انجام تحقیقی بر روی آلیاژ ۷۰۱۰ بیان داشته‌اند که دانه‌ها در سرعت‌های دورانی و

پیشروی مشخصی حین فرآیند FSW، پایدار شـده و در اثر عملیات PWHT به طور غیر عادی رشد نمـی‌کننـد. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که اگر اندازۀ دانه‌هـای اولیـه کوچک باشد (به عنوان مثال زمانی کـه نـسبت سـرعت دورانی ابزار کم و سرعت پیشروی در فرآیند FSW بالا است) نیروی رانش جهت رشد دانه‌ها بیـشتر از نیـروی مقابله کننده در برابر رشد دانه‌ها از طرف ذرات و موانع (pinning) مـی‌باشـد، و بنـابراین پدیـده AGG اتفـاق می‌افتد. اما عوامل دیگری هـم در شـروع پدیـده AGG مهم می‌باشند.

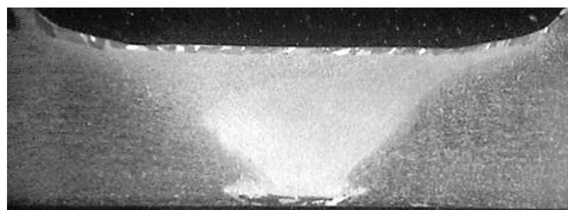
عوامل مهم در پدیده AGG عبارتند از ذرات فـاز ثانویه، تکسچر و جهت تنش‌های سـطحی در دو سـطح بالا و پایین سطح اتصال. Humphreys و Hatherly [13] اثر ذرات فاز ثانویه بر پدیده AGG را مورد بررسی قرار داده و بیان نموده‌اند کـه مقـدار پـارامتر مـانع Pinning (parameter که با Z نشان داده شده و مطابق رابطـه (١) تعریف می‌شود، تنهـا عامـل مـؤثر در چگـونگی رشـد دانه‌ها بعد از تبلور مجدد می‌باشد.

$$Z = \frac{3F_v \overline{D}}{2d} \quad (١)$$

$\overline{D}$ اندازه متوسط دانه‌ها ، F_v کـسر حجمـی و d قطر متوسط ذرات فاز ثانویه می‌باشند. چگـونگی رشـد دانه‌ها بعد از تبلور مجدد، با توجـه بـه مقـدار Z تعیـین می‌شود. اگر $0<Z<0.1$ باشد احتمال رشد عادی دانه‌ها وجود دارد، اگر $0.1<Z<0.25$ باشد رشد غیر عـادی در کنار رشد عادی دانه‌ها محتمـل اسـت، اگـر $0.25<Z<1$ تنها پدیده AGG اتفاق می‌افتد و اگر $Z>1$ باشد دانه‌هـا هیچگونه رشدی نخواهند داشت.

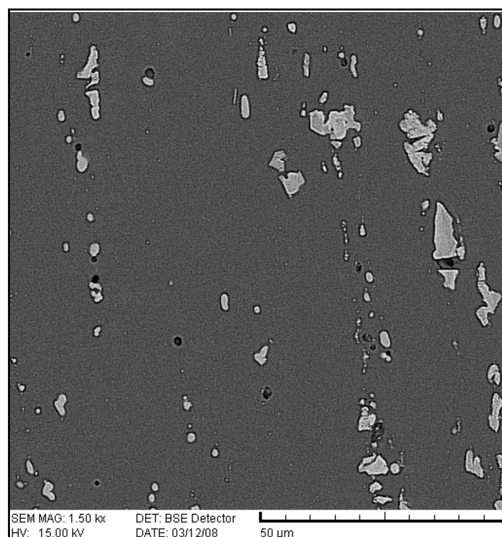


(الف)

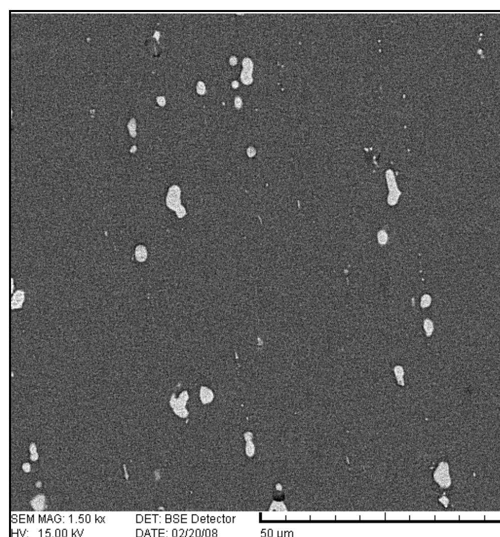


(ب)

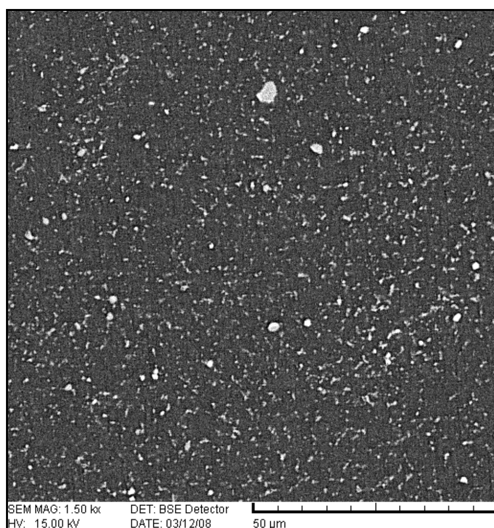
شکل ٤ تصویر منطقۀ اتصال بعد از عملیات PWHT
الف) ω = 450 rpm و ب) ω = 900 rpm



(الف)



(ب)

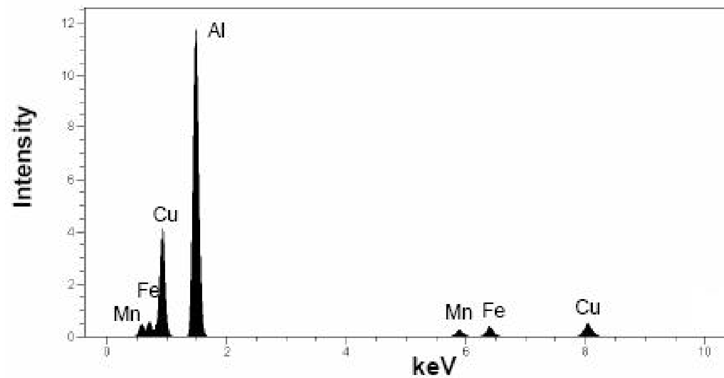


(ج)

شکل ۵ تصویر SEM قبل از عملیات PWHT، الف) فلز پایه، ب) ω= 450 rpm و ج) ω= 900 rpm

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مربوط به ریزساختار فلز پایه و منطقه اختلاط نمونه‌ها، در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود این ذرات حین فرایند جوشکاری خرد شده و با افزایش سرعت دورانی ابزار شدت خرد شدن افزایش می‌یابد.

در شکل (٦) نتایج آنالیز EDS این ذرات آورده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود این ذرات حاوی عناصر Al، Fe، Mn و Cu می‌باشند، و با توجه به تحقیقات منتشر شده [14,15] این ذرات در فاز زمینه نامحلول می‌باشند. این ذرات می‌توانند مانعی در برابر رشد غیر عادی دانه‌ها باشند.



شکل ٦ آنالیز EDS از ذرات مشاهده شده در شکل ٥

جدول ٢ نتایج مربوط به اندازه گیری قطر متوسط دانه‌ها،
کسر حجمی و قطر متوسط ذرات و محاسبه Z

نام نمونه	D (μm)	F_v (%)	d (μm)	Z
فلز پایه	٥٠	٠/٢١	٢/٣٢	٦/٧٨
ω = 450 rpm	٤	٠/١٧	١/٧٣	٠/٥٩
ω = 900 rpm	١٢	٠/١٨	١/٢٦	٢/٥٧

با استفاده از نرم افزار Image Analyzer اندازه متوسط و کسر حجمی ذرات مشاهده شده در شکل(٥) و اندازه متوسط دانه‌ها در شکل (٣) اندازه‌گیری شده و مقدار Z برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه گردید که نتایج آن در جدول (٢) آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقدار Z در فلز پایه و منطقهٔ اتصال نمونه‌ای که سرعت دورانی آن ٩٠٠rpm بوده است، بالاتر از ١ بوده و بنابراین مطابق مدل Humphreys هیچگونه رشدی اتفاق نمی‌افتد ولیکن در منطقهٔ اتصال نمونه‌ای که سرعت دورانی آن ٤٥٠rpm بوده، مقدار Z بین ٠/٢٥ و١ می‌باشد. بنابراین، رشد غیر عادی دانه‌ها اتفاق می‌افتد به عبارت دیگر می‌توان گفت در نمونه یاد شده، از آنجاکه گرمای ورودی حین جوشکاری پایین بوده و اندازهٔ دانه‌های منطقهٔ اتصال، کوچک هستند، نیروی رانش برای پدیده AGG حین عملیات حرارتی بعدی فراهم می‌باشد و از طرف دیگر سرعت دورانی آنقدر بالا نبوده است که سبب خرد شدن شدید ذرات پایدار در آلیاژ شده و قدرت ممانعت ذرات در برابر پدیده AGG را افزایش دهد.

نتیجه

در این تحقیق اثر سرعت دورانی ابزار بر ریزساختار منطقهٔ اتصال آلیاژ 2024-T8 به ضخامت ٥ mm قبل و بعد از عملیات حرارتی بررسی شده است. نتایج به دست آمده به شرح ذیل می‌باشد:

١- در مناطق حرارت دیده به خاطر فراپیر شدن رسوبات استحکام دهنده حین فرایند FSW افت سختی اتفاق می‌افتد که این افت با عملیات PWHT حذف می‌شود.

٢- خرد شدن ذرات بین فلزی حین فرایند FSW اتفاق

می‌افتد که با افزایش سرعت دورانی ابزار شدت آن افزایش می‌یابد.

۳- دانه‌های منطقهٔ اتصال بسیار ریز و هم محور می‌باشند و با افزایش سرعت دورانی ابزار اندازهٔ آنها افزایش می‌یابد.

٤- حین عملیات PWHT رشد غیر عادی دانه‌ها در کل منطقهٔ اتصال نمونه‌ای که حین فرایند FSW، سرعت دورانی ابزار ٤٥٠ rpm بوده است، اتفاق می‌افتد. در حالی که دانه‌ها در منطقهٔ اتصال نمونه‌ای که سرعت دورانی ابزار حین فرایندFSW، ۹۰۰ rpm بوده است پایدار شده‌اند.

۵- پارامتر زنر عامل اصلی در پدیده AGG است. با افزایش سرعت دورانی ابزار پارامتر زنر به گونه‌ای تغییر می‌کند که رشد غیر عادی دانه‌ها حین عملیات PWHT اتفاق نمی‌افتد. در واقع با افزایش سرعت دورانی ابزار و افزایش اندازهٔ دانه‌های منطقهٔ اتصال، نیروی رانش جهت پدیده AGG حین عملیات PWHT کاهش می‌یابد، از طرف دیگر با افزایش سرعت دورانی و افزایش شدت خرد شدن ذرات بین فلزی قدرت ممانعت این ذرات در برابر پدیده AGG، نیز افزایش می‌یابد.

مراجع

1. Thomas W. M., "Friction stir butt welding", International Patent Application PCT/GB92, Patent Application GB9125978.8, 6, December (1991).
2. Di S., Yang X., Luan G., and Jian B., "Comparative study on fatigue properties between AA2024-T4 friction stir welds and base materials", Mat. Sci. Eng., Vol. 436A, pp. 389-395, (2006).
3. Fersini D., and Pirondi A., "Fatigue behaviour of Al2024-T3 friction stir welded lap joints", Eng. Frac. Mech., Vol. 74, pp. 468-480, (2007).
4. Mishra R. S., and Ma, Z.Y., "Friction stir welding and processing", Mat. Sci. Eng., Vol. 50, pp. 1-78, (2005).
5. Su J.Q., Nelson T.W., Mishra R., and Mahoney, M., "Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium", Acta. Mat., Vol. 51, pp.713-729, (2003).
6. Genevois C., Fabrègue D., Deschamps A., and Poole J., "On the coupling between precipitation and plastic deformation in relation with friction stir welding of AA2024 T3 aluminium alloy", Mat. Sci. Eng., Vol. 441A, pp. 39-48, (2006).
7. Attallah M. M., and Salem H.G., "Friction stir welding parameters: a tool for controlling abnormal grain growth during subsequent heat treatment", Mater. Sci. Eng., Vol. 391A, pp. 51-59, (2005).
8. Chen Y.C., Feng J.C., and Liu H.J., "Stability of the grain structure in 2219-O aluminum alloy friction stir welds during solution treatment", Mater. Charac., Vol. 58, pp. 174-178, (2007).
9. Charit I., Mishra R. S., and Mahoney M. W., "Multi-sheet structures in 7475 aluminum by friction stir welding in concert with post-weld superplastic forming", Scripta Mater., Vol. 47, pp. 631-636, (2002).
10. Sato Y. S., Watanabe H., Park S.H.C., and Kokawa H., Proc. 5th Int. Symp., Friction Stir Welding, Metz, France, (2004).
11. Smith W.F., "Structure and Properties of Engineering materials", 2nd ed., McGraw-Hill, (1987).

12. Charit I., Mishra R. S., and Mahoney M. W., "Multi-sheet structures in 7475 aluminum by friction stir welding in concert with post-weld superplastic forming", Scripta Mater. Vol. 47, pp. 631-636, (2002).
13. Humphreys F.J., and Hatherly M., "Recrytallization and Related Annealing Phenomena" 2^{nd} ed., Elsevier, (2004).
14. Barcellona A., Buffa G., Fratini L., and Palmeri D., "On microstructural phenomena occurring in friction stir welding of aluminium alloys", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, pp. 340-343, (2006).
15. Charit I., and Mishra R. S., "High strain rate superplasticity in a commercial 2024 Al alloy friction stir processing", Materials and Engineering A, Vol. 359, pp. 290-296, (2003).